



LANDSKAPSARKITEKTUR
TRÄDGÅRD VÄXTPRODUKTIONSVETENSKAP
Rapportserie



Modern växthusbelysning

-ett kompendium om växthusbelysning

Karl-Johan Bergstrand

Institutionen för biosystem och teknologi

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap

Rapport 2015:20

ISBN 978-91-576-8910-8

Alnarp 2015



LANDSKAPSARKITEKTUR
TRÄDGÅRD VÄXTPRODUKTIONSVETENSKAP
Rapportserie

Modern växthusbelysning

-ett kompendium om växthusbelysning

Karl-Johan Bergstrand

Institutionen för biosystem och teknologi

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap

Rapport 2015:20

ISBN 978-91-576-8910-8

Alnarp 2015

Referera gärna till rapporten på följande sätt:
Bergstrand, Karl-Johan. 2015. Modern växthusbelysning.
ISBN: 978-91-576-8910-8

Omslagsfoto: Fionia
Tryckår: 2015

Kontakt
Karl-Johan.Bergstrand@slu.se
www.slu.se/bt

Innehåll

Förord.....	1
1 Introduktion	2
2 Ljuset	3
2.1 Vad är ljus?	3
2.2 Mätning av ljus.....	4
3 Växternas reaktioner på ljus	3
3.1 Växternas absorption av ljus	3
3.2 Produktionsfysiologiska aspekter.....	5
3.3 Styrning av ljus	7
3.4 Styrning av tillväxten med hjälp av ljuset	8
4 Tekniken	9
4.1 Äldre lamptyper.....	9
4.2 Lysrör och kompaktlysrör	10
4.3 Urladdningslampor	10
4.4 LED-lampor	14
4.5 Andra lamptyper.....	16
4.6 Effektiviteten hos olika lamptyper	18
5 Kulturrena	18
6 System på marknaden	19
6.1 Urladdningslampor	19
6.2 LED-lampor	20
6.3 Andra lamptyper.....	22
7 Leverantörerna	23
8 Referenser.....	25

Förord

Ett kompendium om växthusbelysning utarbetades av Birger Sandahl år 1979. Sedan dess har mycket hänt och tekniken har utvecklats kraftigt. Detta i kombination med ett ökande intresse för odling med hjälp av artificiellt ljus har gjort att behovet av ett nyskrivet kompendium inom området blev uppenbart. Förhoppningen är att det ska komma till användning främst inom utbildningen vid SLU samt vid andra trädgårdsutbildningar i landet, men även komma odlare både på professionell såväl som på hobbynivå till glädje och nytta. Tekniken utvecklas fortsatt snabbt och en ny upplaga kommer sannolikt att behöva ges ut inom inte alltför många år.

Alnarp 2015-06-08

Karl-Johan Bergstrand

1 Introduktion

Ljuset är växternas energikälla och den viktigaste tillväxtfaktorn. Förutom att tjäna energikälla ger ljuset också växten information om årstid, tid på dygnet och något om hur växtens omgivning ser ut. Att i första hand utnyttja det naturliga solljuset har alltid varit en självklarhet och ligger bakom uppfinningen av växthuset. Även om man i ett växthus med hjälp av uppvärmning kan skapa ett sommarklimat mitt i vintern är ljuset i norra Europa helt otillräckligt vintertid även i de ljusaste moderna växthus (Mortensen 2014). Tillskott är alltså nödvändigt. Redan kort efter att det elektriska ljuset uppfunnits insåg man möjligheten att använda elektriskt ljus för att driva fotosyntesen i gröna växter. På Alnarps trädgårdar bedrevs försök med belysning, ”bestrålning” redan på 1930-talet med hjälp av glödlampor och neonrör (Lind & Thulin 1939). Ungefär samtidigt skedde den kommersiella introduktionen av assimilationsbelysning i trädgårdsnäringen. Vid denna tid var det mest glödlampor och kvicksilverlampor som användes. Främst var det vid plantuppdragning vintertid belysning användes. Under 1950-talet slog användningen av fotoperiodiskt ljus för att styra blomningen hos dagslängdsberoende växtslag igenom. Vanligtvis användes glödlampor som gav låg investeringskostnad samtidigt som glödlampan har en ljuskvalité som gör den lämpad för fotoperiodiska applikationer.

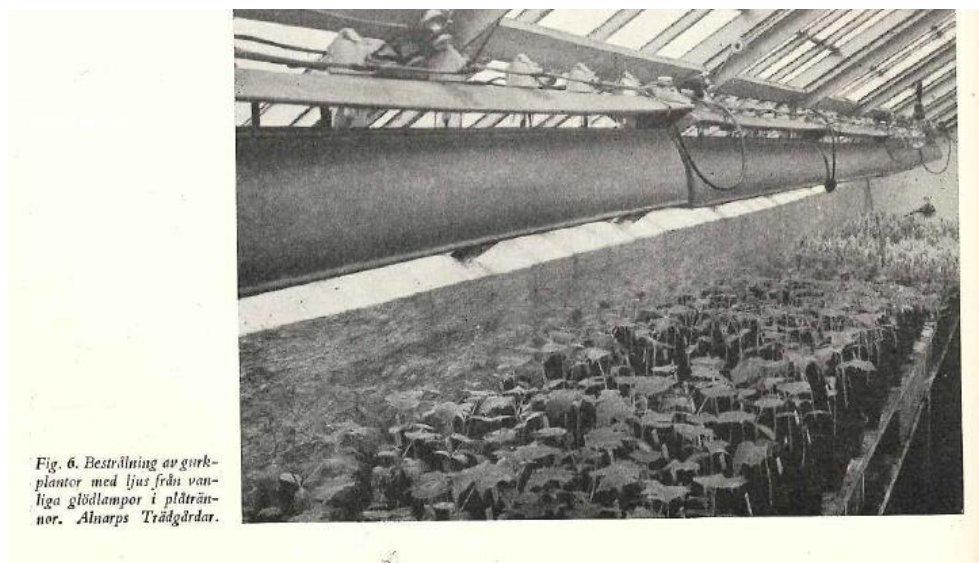


Bild 1: Redan på 1930-talet användes ”bestrålning” av plantor, här med hjälp av glödlampor vid Alnarps trädgårdar. Ur ”Svenska trädgårdar” (Lind & Thulin, 1939)

Under 1960-talet skedde en teknikutveckling som innebar att urladdningslampor, först av typen metallhalogen och senare högtrycksnatriumlampor. Dessa lamptyper gav högt ljusutbyte och hade lång livslängd. Detta banade väg för en mer utbredd användning av konstljus inom hortikulturen, inte bara för plantuppdragning utan

genom hela produktionscykeln vid produktion av t.ex. krukväxter. Särskilt goda resultat kunde uppnås om tillskottsbelysningen kombinerades med CO₂-gödsling, som också introducerades vid den här tiden. En kontinuerlig förfining av tekniken har skett och användningsområdena har expanderat. Under 1990-talet började man att odla grönsakskulturer året runt i norra Europa med hjälp av stora mängder belysning. Ungefär vid samma tid började man intressera sig för odling i helt slutna utrymmen, s.k. *plant factories*. Detta innebär att klimatet kan kontrolleras mer exakt, att odlingen kan bedrivas med mycket hög hygienisk standard och att man blir oberoende av de yttre faktorerna och kan t.ex. etablera odlingar i källarutrymmen. Japan är drivande inom denna utveckling. Under början av 2000-talet togs ett nytt tekniksprång inom belysningsteknik drivet av ökande energipriser, stigande miljömedvetenhet samt myndighetsbeslut kopplade till detta t.ex. utfasningen av glödlampor och andra ineffektiva ljuskällor. Nya ljuskällor har introducerats både för allmänbelysning och odlingsbelysning. LED-baserade ljuskällor har rönt mest intresse, men även andra nyare tekniker har potential att komma till användning i hortikulturella applikationer, såsom plasmalampor, induktionslampor eller fältemissionslampor. Utvecklingen har inte bara inneburit mer effektiva ljuskällor med längre livslängd, utan även möjligheter till större valfrihet när det gäller ljusets spektrala kvalitet. I vissa fall är det även möjligt att över tid ändra ljusets spektralfördelning. Detta innebär helt nya möjligheter att aktivt använda ljuset i produktionen, ensamt eller i samspel med naturligt ljus, för att optimera produktionen med hänsyn både till tillväxt, till produktkvalitet och till totalekonomi. Dessutom innebär t.ex. LED-tekniken ett med modultärt uppbyggnadssätt vilket möjliggör bättre anpassning av ljuskällan till olika odlingssystem. Den snabba teknikutvecklingen inom halvledarområdet och därmed inom belysningstekniken skapar alltså helt nya förutsättningar och ett förnya intresse för användning av ljus inom hortikultur, och på sikt kanske en helt ny struktur hos den hortikulturella produktionen på nordligare breddgrader.

Belysning inom hortikultur används alltså främst på tre sätt (Canham, 1966):

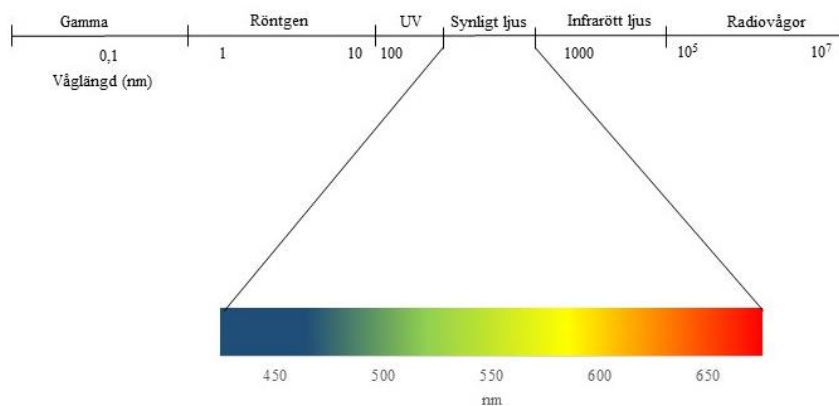
- 1: Som tillskott till naturligt ljus i växthus
- 2: Som fotoperiodiskt ljus för att styra blomningen hos dagslängdsberoende växtslag
- 3: Som enda ljuskälla vid odling i odlingskammare eller ”plant factories”

2 Ljuset

2.1 Vad är ljus?

Rent fysikaliskt kan ljus beskrivas både som partiklar och som elektromagnetisk strålning. Det synliga ljuset har våglängder mellan 400 och 700 nm, och överens-

stämmer i stort sett med växternas fotosyntesaktiva spektrum. Området mellan 400 och 700 nm kallas PAR (Photosynthetic Active Radiation)-området. Blått ljus har kortast våglängd (400-500 nm) och är mer energirikt än rött ljus som har våglängder mellan 600 och 700 nm. Ljus med våglängder mellan 100 och 400 nm kallas UV-ljus. Ljus med våglängder mellan 700 och 1000 nm kallas IR-ljus eller helt enkelt värmestrålning. Ljus med våglängder mellan 700 och 800 nm brukar i växtsammanhang kallas mörkrött, långrött eller Near Infra Red (NIR)-ljus. Såväl UV- som långrött ljus påverkar växterna även om de inte direkt deltar i fotosyntesen.



Figur 1: Det synliga ljusets plats i det elektromagnetiska strålningsspektret. Observera att skalan är icke-linjär.

2.2 Mätning av ljus

En mängd olika enheter florerar när det gäller mätning av ljus. Problemet med att mäta ljus är att olika våglängder har olika energiinnehåll. Lux är ett ofta använt mått på hur mycket ljus som faller på en yta (illuminans). Begreppet lux är baserat på det mänskliga ögats uppfattning av ljuset, och inte på ljusets energiinnehåll. Detta innebär att lux är en olämplig enhet för mätning av växtljus. En lämpligare enhet i växtsammanhang är mikromol per kvadratmeter och sekund ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, tidigare även kallat mikroeinstein). Detta är ett absolut mått baserat på antalet fotoner och blir mer rättvisande än lux-begreppet, även om μmol -begreppet inte tar hänsyn till att fotoner av olika våglängd har olika energiinnehåll. Mätningar i μmol omfattar endast PAR-spektret d.v.s. 400-700 nm våglängd. Typiska värden för $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$: utomhus en solig sommardag: c:a 2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, tillskott i växthus 100-200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, växternas kompensationspunkt (=ljusintensiteten där nettotillväxt börjar) 10-30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Ljusavgivningen från en ljuskälla mäts i $\mu\text{mol}/\text{s}$. Om en lampa avger 1000 $\mu\text{mol}/\text{s}$ och detta ljus projiceras på en yta av 2 m² blir ljusintensiteten på den ytan 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Om man dubblar avståndet mellan ljuskällan och den belysta ytan minskar ljusintensiteten på ytan till 25%. Man förlorar inget ljus eftersom den belysta ytan då istället blir fyra gånger så stor.

Effektiviteten hos en lampa mäts i $\mu\text{mol}/\text{W}$, d.v.s. hur många μmol som kommer ur lampan per W elektrisk effekt lampan drar. Normalt sett ger lampor till växtbelysning c:a 1,5-2 $\mu\text{mol}/\text{W}$. Detta mått används för att jämföra olika lampportypers effektivitet.

Den totala dagliga ljusmängden (Ljussumman eller Daily Light Integral, DLI) som tillförs mäts i enheten mol/dag (Jennerich 1993). Ljussumman beräknas genom att multiplicera ihop ljusstyrkan i $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ med antalet sekunder ljus ges. För enkelhetens skull kan nedanstående formel användas:

$$\text{Ljussumma (mol/dag)} = \frac{\text{Intensitet } (\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}) * \text{Antalet timmar} * 3600}{1000000}$$

De flesta kulturer har ett behov på 12-25 mol/dag (Bævre & Gislerød 1999). Under vintermånaderna ligger instrålningen i skandinavien på 1-5 mol/dag och det mesta av ljuset behöver tillföras som konstljus (Mortensen 2014).

Utöver μmol används ibland begreppet W/m^2 . Begreppet kan användas i två sammanhang: dels när man talar om installerad effekt per kvadratmeter hos en belysningsinstallation, dels mäter vissa klimatdatorer instrålningen i W/m^2 . Klimatdatorns mätning omfattar då alla våglängder, d.v.s. även UV och IR som ligger utanför PAR-spektret. Observera att en installerad belysningseffekt på 100 W/m^2 inte innebär att man får 100 W/m^2 i strålning; beroende på lamptyp blir en del av den inmatade energin till sensibel värme och inte strålning.

Även luxbegreppet används av vissa klimatdatorer för att beräkna ljussumma. Denna uttrycks då som kiloluxtimmar (klxh).

Ljusets kvalitet är svårare att kvantifiera utifrån ett växtperspektiv. För ljus avsett för mänskliga ögon brukar man ange färgtemperaturen i Kelvingrader, där ett högre gradtal innebär ett kallare "vitare" ljus. Ibland rekommenderas kallvitt ljus för växter eftersom det normalt sett innehåller mer blått ljus. Kelvin-måttet är dock inte särskilt användbart för växtbelysning eftersom det inte är konstant; en mängd olika procentuella kombinationer av blått/grönt/rött ljus kan ge upphov till samma färgtemperatur. Ransmark (2002) introducerade en metod för att relatera ljusstemperatur och ljusintensitet med avseende på växtbelysning, men beräkningsmetoden har inte vunnit genomslag.

Olika mätare ger olika mätresultat, bl.a. beroende på att givare från olika tillverkare har olika känslighet för olika våglängder. Vissa mätare mäter t.ex. bara upp till c:a 650 nm och missar alltså en hel del fotosyntesaktivt ljus. Givarens utformning har också betydelse. Oftast används en plan givare, som "favoriserar" vinkelrätt fallande ljus men underestimerar diffust ljus. En halvsfärisk givare ger ett mer rättvisande mätvärde i växtsammanhang, eftersom en planta kan sägas vara en halvsfärisk struktur som tar upp ljus från alla riktningar.

Enhet	Anger	Anmärkning
Lux	Ljusintensitet (Illuminans)	Olämplig i växtsammanhang
Lumen	Ljusflöde från en lampa, kopplat till Lux	Som ovan
$\mu\text{mol/s}$	Ljusflöde från en lampa	PAR-spektrat 400-700 nm
$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$	Ljusintensitet (absolut mått)	Lämplig enhet till växtbelysning
$\mu\text{mol/W}$	Effektiviteten hos en lampa	Ju högre ju bättre
Mol/dag	Ljussumma per dag	
W/m^2 (1)	Installerad elektrisk effekt i belysning	
W/m^2 (2)	Totalt energiflöde	Innefattar även IR och UV
Joule/m²	Wattsekunder/m ²	Som ovan
Joule/m²/dag	Strålsumma baserat på W/m^2	Som ovan
Kelvingrader	Ljustemperatur	Inte relevant i växtsammanhang

Tabell 1: Olika enheter för ljus



*Bild 2: Mätare som mäter
ljusintensiteten i $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.
Foto: K-J Bergstrand*

3 Växternas reaktioner på ljus

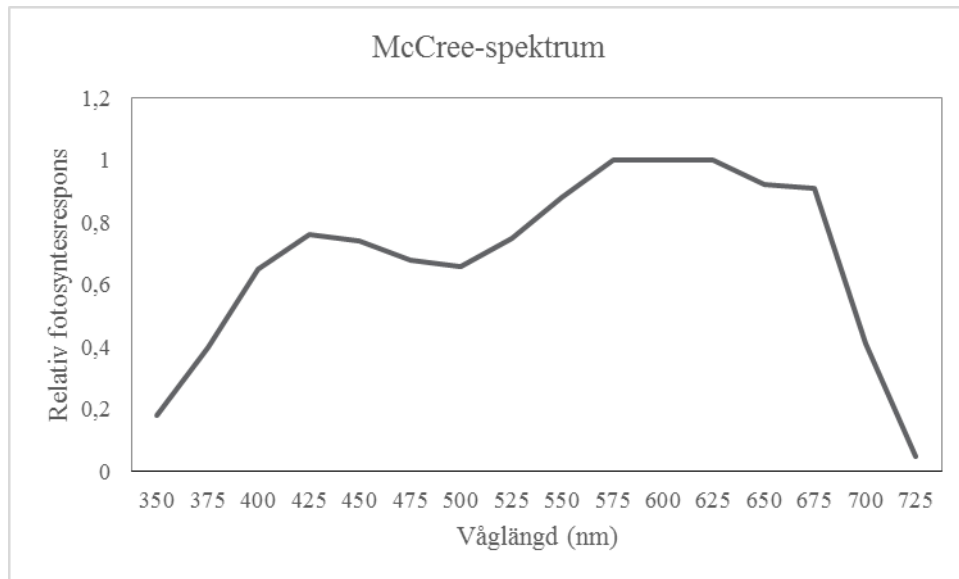
3.1 Växternas absorption av ljus

Ljuset utgör energikälla för växterna genom fotosyntesen, men växterna använder även ljuset som informationskälla; ljusets kvalitet (spektrala sammansättning) och dagens (fotoperiodens) längd ger växten information om tid på dagen, tid på året och hur omgivningarna ser ut. Ljuset absorberas av olika pigment, primärt klorofyll (det finns två sorter, klorofyll a och klorofyll b, med en liten skillnad i absorptionspektrum). Klorofyllet finns i små ”korn” i bladen som kallas kloroplaster.

De flesta vet att växterna i första hand använder rött och blått ljus, medan grönt ljus i större utsträckning reflekteras eller transmittas (går igenom bladet), vilket är orsaken till att våra ögon uppfattar växterna som gröna. Däremot innebär detta inte att växterna överhuvudtaget inte kan tillgodogöra sig det gröna ljuset; man kan odla växter i enbart grönt ljus, även om tillväxten blir lite mindre. En vanlig missuppfattning är att klorofyllets absorptionspektrum, med tydliga toppar i det blåa resp. röda området av spektret, är samma sak som växtens utnyttjande av ljuset. Det finns flera andra pigment som fångar in ljuset. Därutöver är det skillnad på hur en enskild kloroplast eller ett enskilt blad absorberar ljuset och på hur ett helt bladverk absorberar ljuset. Det gröna ljuset, som inte absorberas så väl av bladen, tränger därför djupare in i bladverket där det så småningom absorberas. Ett helt bladverk utnyttjar alltså ljuset bättre än ett enskilt blad.

Olika växter har olika aktionsspektrum för fotosyntesen. McCree (1972) mätte aktionsspektret hos 22 olika växtslag och beräknade utifrån detta ett generellt aktionsspektrum, som kan ses nedan. Av detta framgår att spektret har två toppar, en i

det blåa området runt 430 nm våglängd och en i det röda området runt 500-620 nm. Det gröna ljuset, våglängder runt 500-550 nm, ger en fotosyntesaktivitet motsvarande ungefär 60% mot samma mängd rött ljus. Observera särskilt att toppen i det röda området ligger runt 600-620 nm och alltså skiljer sig från toppen i klorofyllets absorptionsspektrum, som ligger runt 660 nm. Denna responskurva gäller för ett enskilt blad. Ett helt bladverk kommer att utnyttja ljuset bättre, eftersom det ljus som inte absorberas fullt ut i det översta bladskiktet istället tas om hand av lägre liggande bladskikt. Allt ljus som absorberas av bladet går in i fotosyntesen och utnyttjas.



Figur 2: Fotosyntesens relativa aktionsspektrum, baserat på mätningar på 22 olika arter. Fritt efter McCree (1972).

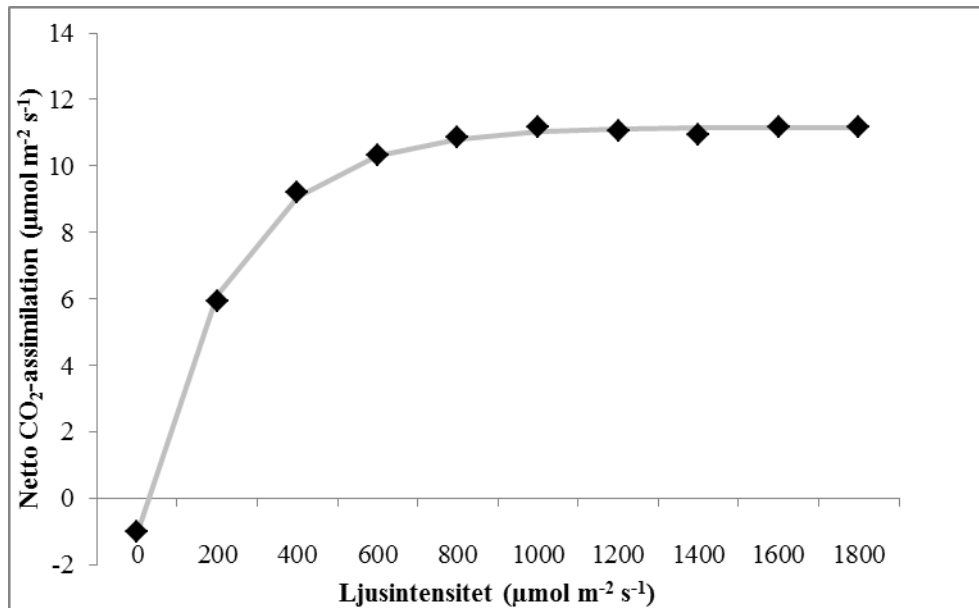
Som nämndes i inledningen använder inte bara som energikälla utan även som informationskälla. Växten använder så kallade ljusreceptorer för att känna kvalitén (den spektrala sammansättningen) på ljuset. Blått ljus påverkar växtens sträckning och orientering, samt öppningen av klyvöppningarna. Blått ljus påverkar klyvöppningarna till att öppna sig och släppa in CO_2 i bladet, i synnerhet på morgonen (Taiz & Zeiger 2002). Gryningsljuset är relativt rikt på blått ljus, så det blåa ljuset ger växten en signal om att det är morgon.

Rött och mörkrött ljus påverkar fytokromsystemet som i sin tur påverkar växternas dagslängdsreaktion (blombildning), frögroning och sträckningstillväxten när växten hamnar i skugga. För dagslängdsreaktionen är det främst det mörkröda ljuset som är viktigt. Detta är orsaken till att glödlampor, som avger mycket mörkrött ljus, är lämpliga för dagsförlängning om man vill blominducera långdagsplanter eller förhindra kortdagsplanter från att gå i blom. Mycket mörkrött ljus i förhållande till mängden rött ljus innebär ökad sträckningstillväxt. Man talar då om rött:långroött eller R:FR-förhållande. Dagsljus har ett R:FR-förhållande på c:a 1 mitt på dagen, medan skymnings- och gryningsljuset innehåller mer mörkrött ljus och alltså har ett lägre R:FR-förhållande. Växternas reaktion på lågt R:FR-

förhållande har en funktion i naturen; eftersom fotosyntesen inte absorberar det mörkröda ljuset i någon större omfattning kommer det mörkröda ljuset att i huvudsak reflekteras från eller gå igenom bladet, medan det röda ljuset absorberas. Ljus som passerat igenom ett bladskikt får alltså lägre R:FR-förhållande. Växter uppfattar det lägre R:FR-förhållandet som skugga och börjar sträcka sig för att försöka växa förbi sina konkurrenter. Det är alltså R:FR-förhållandet och inte ljusets intensitet som gör att växten kan avgöra om den står i skugga eller inte.

3.2 Produktionsfysiologiska aspekter

Det naturliga ljuset utgör basen för växthusproduktion och ska alltid utnyttjas bäst möjligt. De flesta kulturer behöver 12-25 mol ljus/dag för att utvecklas väl (Moe m.fl. 2006). Vintertid kan den dagliga naturliga ljussumman i skandinavien ligga så lågt som 1 mol/dag. Därtill kommer ljusförluster i växthusets täckmaterial och skuggeffekter från växthuskonstruktion och inredning, vilket gör att vi i praktiken inte kan räkna med att mer än c:a hälften av ljusnivån utomhus når plantorna. Under perioden oktober-februari är alltså tillskottsbelysning i princip nödvändig för att kunna bedriva produktion. Ljuskrävande kulturer kan kräva tillskottsbelysning i hela perioden augusti-maj. Ljus kan ges både i kombination med dagsljuset eller under de timmar på dygnet då det är mörkt ute. Generellt brukar man anse att ljuset gör bäst nytta upp till en ljusintensitet om c:a 200-300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Vid högre ljusstyrkor börjar ljus-responskurvan hos många växter att plana ut (figur 3) och ljusutnyttjande (Light Use Efficiency, LUE) går ned. Vid god naturlig instrålning kan det alltså vara god idé att släcka belysningen, för att istället ge en period med ljus under natten. Tjockbladiga växter såsom Kalanchoe är något sämre än mera tunnbladiga växter när det gäller att utnyttja höga ljusintensiteter (Mortensen 2000). För att utnyttja ljuset optimalt är det viktigt att plantorna inte lider brist på vatten eller näring. CO_2 -koncentrationen är också viktig att hålla koll på. Effektiviteten hos fotosyntesen ökar med c:a 30% om CO_2 -koncentrationen i luften höjs från det naturliga c:a 400 ppm till 1000 ppm. Vid ökad CO_2 -koncentration förskjuts hela ljus-responskurvan (figur 3) uppåt, vilket innebär att ökad CO_2 -koncentration ger relativt sett störst effekt vid låga ljusintensiteter. I ett oluftat växthus med belysning kan CO_2 -koncentrationen snabbt sjunka ner till nivåer under 300 ppm, och då avstannar fotosyntesen i princip helt. För att få ett gott utnyttjande av ljuset bör assimilationsbelysning alltid kombineras med CO_2 -dosering. Enda undantaget är vissa prydsväxter där förhöjd CO_2 -halt kan leda till oönskad vegetativ tillväxt. Även i dessa fall bör man dock tillse att CO_2 -koncentrationen inte understiger 400 ppm då belysningen är tänd, antingen genom luftning eller genom att tillföra CO_2 .



Figur 3: Ljusresponskurva hos julstjärna. Vid ljusintensiteter över $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ blir fotosyntesapparaten mättad och utbytet sjunker. Skalan på y-axeln visar upptag av CO_2 per ytenhet blad. Då ljusstyrkan är 0 är fotosyntesen negativ; plantan har mörkerrespiration och avger CO_2 . Från Bergstrand m.fl. (2015a).

Som framgår av figur 2 har alltså det orangeröda ljuset bäst effekt på fotosyntesen. Ett ljusspektrum avsett för odling bör alltså innehålla huvuddelen rött ljus, 60-70% av ljuset bör vara inom det röda området (600-700 nm). Hur mycket blått ljus det bör finnas beror på kulturen. Har man höga krav på ett kompakt växtsätt, t.ex. då det rör sig om produktion av krukväxter eller grönsaksplantor för omplantering kan man ha 10-15% blått ljus, vilket då kommer att ge upphov till kompakta plantor. Vill man ha maximal tillväxt bör man däremot inte ha mer än c:a 5% blått ljus. Detta eftersom det blåa ljuset begränsar cellexpansionen och leder till mindre blad-yta, vilket i sin tur ger lägre tillväxt. Dessutom är fotosyntesutbytet lägre med blått ljus än med rött ljus. Resterande cirka 20% kan vara fördelade på övriga våglängder, t.ex. inom det gröna spektret. Lite mörkrött ljus bör också finnas med. Ett högt rött/långroöttförhållande (10-20) bidrar till kompakt växtsätt. Figur 6 visar ett spektrum lämpligt till odling, möjligen med förbehållet att andelen blått ljus i exemplet är något för hög för att ge maximal tillväxt.

Normalt sett är lamporna monterade över kulturen. Med traditionella urladdningslampor har detta varit den bästa lösningen eftersom lampornas strålningsvärme och koncentrerade ljusavgivning innebär att ett visst avstånd krävs mellan ljuskälla och blad. På senare år har man även börjat med ljuskällor monterade inne i bladverket, s.k. interlighting. För det enskilda bladet har det nämligen ingen större betydelse vilken riktning ljuset kommer ifrån. Både HPS-lampor och LED-lampor kan användas. Ibland används LED-lampor inne i bladverket och HPS-lampor som toppbelysning (över bladverket). Man talar dom om ett hybridssystem. Fördelarna med interlighting är att ljuset bättre når äldre blad längre ner i bladverket, att man redu-

cerar skuggningseffekterna från armaturerna samt att värmen från ljuskällan kommer kulturen till godo och fungerar som ersättning för beståndsvärmerör. Även för kulturer som odlas på rännbord är det möjligt att tillföra ljus underifrån genom att montera LED-ljuskällor mellan rännorna (Bergstrand m.fl. 2015a). Erfarenheterna av interlighting är dock blandade. Medan man i Finland uppnått ökad avkastning i gurka med HPS-lampor monterade mellan planträderna (Hovi-Pekkanen & Tahvonnen 2008) har man i Nederländerna inte fått någon ökad avkastning genom att använda interlighting med LED i gurka (Trouwborst m.fl. 2010) och tomat (Dueck m.fl. 2011).

3.3 Styrning av ljus

I enklaste fall styrs belysningen enbart av ett tidur som ger önskad belysningstid. I dag är dock styrningen av belysningen ofta integrerad i klimatdatorer vilket ger ökade möjligheter till mer avancerad styrning. Ett vanligt sätt är att låta lamporna släckas vid en viss nivå på den naturliga instrålningen. På så sätt undgår man att komma upp i så höga ljusnivåer att ljusutnyttjandet inte längre är maximalt (figur 3). Man kan undgå övertemperaturer i växthuset och kan också minimera luftningen med följd att CO₂-koncentrationen kan bibehållas hög, under förutsättning att CO₂-tillförsel används. Genom att ställa in en ackumulerad strålsumma som måste uppnås efter att strålningen gått över/under den inställda gränsen för till-frånslag kan antalet till och frånslag vid varierande molninghet begränsas. Vilken ackumulerad strålsumma som är lämplig varierar med årstid. I Priva ställs detta in i I205. Lämpliga inställningar kan vara till/från vid 200 W/m² med en ackumulerad strålsumma om 500-1000 W*min/m² och ett dödband på 25 W. I Senmatic LCC 900 kan man, om funktionsväljaren för belysning ställts i ”Sol u/n”, ställa in en strålningsgräns (W/m²) vid vilken belysningen släcks. I Senmatic LCC4 kan man, utöver en strålningsgräns i kilolux (klx) även ställa in en strålsumma i klxh.

Ett modernare sätt är att styra efter ljussumma eller daglig ljusintegral, DLI. Man ställer då in önskad daglig ljusintegral in mol/dag och låter datorn beräkna hur många timmar belysningen behöver vara tänd för att uppnå önskad ljussumma, inklusive solljus. Detta innebär maximalt utnyttjande av det naturliga ljuset. Man kan även integrera (sammanräkna) ljussumman över en längre period, upp till en vecka. Detta eftersom växterna lagrar assimilater över flera dagar. Under dagar med lägre ljusintegral bör då också dygnsmedeltemperaturen hållas lägre. För närvarande pågår också utveckling av programvara som tar hänsyn till prognoser för väder och elpris några dagar framåt i tiden för att på så sätt optimera insatsen av assimilationsljus. Här kan man utnyttja de ökande fluktuationerna i elpriset som blir följd av större andel vindkraftsel. Växterna i växthusen blir på så sätt något av ett lagringsmedium för elström; man belyser extra mycket under dagar med god tillgång på el och låga elpriser, och kan då reducera belysningen under dagar med höga elpriser.

3.4 Styrning av tillväxten med hjälp av ljuset

Den växtreaktion vi oftast vill styra med hjälp av ljuset är blomningen (fotoperiodism). Långdagsbehandling med konstljus används under vinterhalvåret för att a) blominducera långdagsväxter, b) bibehålla kortdagsväxter i vegetativ fas. För s.k. obligata kort- eller långdagsväxter kan man bestämma en kritisk dagslängd för blombildningen. Många andra växtslag reagerar på dagslängden, t.ex. genom påskyndad blombildning vid lång dag, utan att för den skull ha en absolut bestämbar kritisk dagslängd. Sådana växter kallas fakultativa lång- eller kortdagsplanter (Rünger 1964). Utöver detta finns det växtslag som vanligen anses strikt dagslängdsneutrala.

Ljusintensiteten som krävs för att påverkar växternas dagslängdsreaktion är betydligt lägre än vad som behövs för att driva fotosyntesen. Ljusintensiteter på 1-30 lux räcker för att påverka blombildningen (Rünger, 1964). Detta motsvarar c:a 1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Ljusets kvalitet är viktig i sammahanget. Eftersom det är fytokromsystemet som reglerar växternas dagslängdsreaktion är det viktigt att ljus som används för blomningsreglering innehåller mycket rött ljus (runt 660 nm våglängd) (Rünger 1964). Tidigare har man ofta använt enkla installationer med glödlampor och gummikabel för dagslängdsreglering. Glödlampor är lämpliga för ändamålet på grund av sin höga avgivning av rött ljus. Numera finns LED-baserade ljuskällor med E27-fattning och med ett spektrum liknande glödlampans för att ersätta glödlampor i sådana installationer. Numera är det dock vanligt att man använder lampor som är installerade för assimilationsljus även till dagsförlängning. Om man använder högtrycksnatriumlampor krävs något större ljusintensiteter för att få en säker effekt, eftersom dessa lampor innehåller relativt lite ljus med våglängder runt 660 nm. Det är dock under alla omständigheter tillräckligt med under 20 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Om man ofta använder assimilationsbelysningen som dagförlängning kan det vara värt att installera ett separat belysningssystem för dagförlängning. Det räcker då med avsevärt lägre installerad effekt och en hel del energi kan sparas.

Ljuset påverkar även växternas sträckningstillväxt, såväl dagslängden (fotoperioden) som ljusets kvalitet (spektralfördelning) påverkar sträckningen. Ljus kan alltså vara ett viktigt redskap för att kontrollera sträckningen inte minst i prydnadsväxter. Många växter reagerar med mindre sträckning vid kortare fotoperiod. Användning av kortdagsväx, så att växterna får bara 8 timmar fotoperiod, är ett verkningsfullt sätt att reducera sträckningen i bl. a. *Petunia* och *Scaevola* (Schüssler & Bergstrand 2012). För långdagsväxter appliceras perioden med kortdag i slutet av kulturen, då plantorna redan är blominducerade. I annat fall kommer kulturtiden att bli längre. Ett alternativ är tillämpa mörkläggning 16 h/dygn genom hela kulturtiden och istället ge dagförlängning under mörkläggningen med en ljuskvalité som inte främjar sträckning. Grönt (525 nm) eller orangerött (630 nm) ljus har visat sig vara lämpligt för detta ändamål (Bergstrand m.fl. 2014).

Vid användning av assimilationsbelysning har kvalitén på ljuset stor betydelse. HPS-lampor har ett relativt fördelaktigt rött:mörkröttförhållande men det låga innehållet av blått ljus gör att växter sträcker sig relativt kraftigt med HPS-ljus. LED-

lampor har ofta ett ännu högre rött:mörkröttförhållande än HPS-lampor och avger i regel mer blått ljus vilket kan reducera sträckningen (Terfa m.fl. 2013). Också tillsats av smalspektrumljus som komplement till naturligt solljus kan reducera sträckningen. Det har visat sig att rött ljus (660 nm) har kraftigast effekt. Ett tillskott med bara 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ kan reducera skottlängden i julstjärna med 12% (Bergstrand *m.fl. opubl.*).

4 Tekniken

4.1 Äldre lamptyper

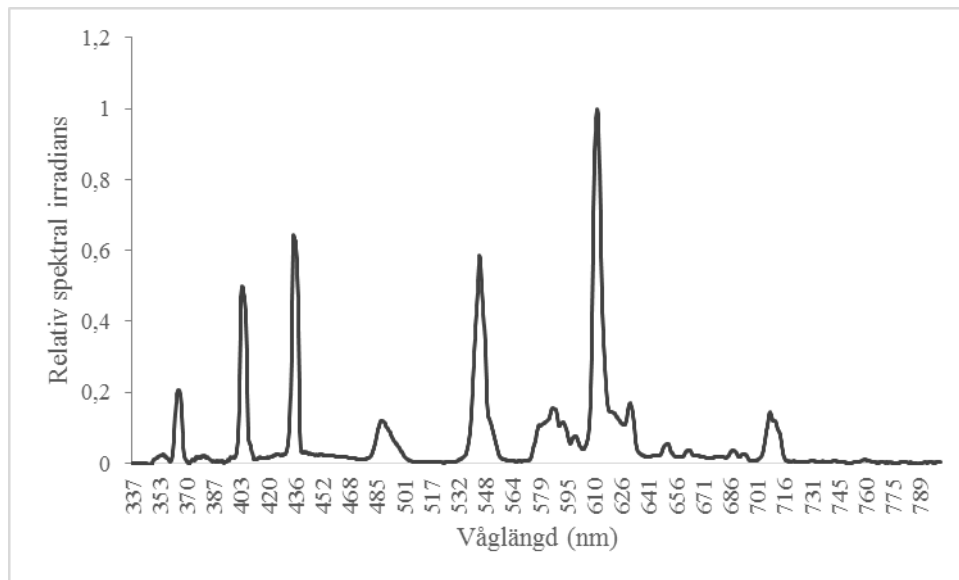
Tidiga försök med elektrisk belysning till växter gjordes med glödlampor. Man kunde då konstatera att det visserligen gick att få växter till att växa enbart i konstljus, men att glödlamporna också gav en oönskad sträckningstillväxt och alltså var mindre lämpade som assimilationsbelysning. Däremot fann man senare, då man på 1950-talet började använda fotoperiodiskt ljus för långdagsbehandling, att glödlampor var ett gott alternativ. Det höga innehållet av mörkrött ljus innebar att endast svaga ljusstyrkor behövdes för att påverka dagslängdsreaktionen. Därtill var installationen billig och enkel och glödlampans okänslighet för täta till- och frånslag och korta starttid gjorde att den lämpade sig för s.k. cyklisk belysning. Detta innebar att man t.ex. lät lamporna vara tända i en minut och släckta i fem minuter, vilket var tillräckligt för att växterna skulle uppfatta att det var dag. På samma gång sparade man ström och kunde belysa större arealer med en relativt liten huvudsäkring. Idag är glödlampan på väg bort från marknaden även om modeller med halogenkapsling kommer att finnas kvar ytterligare några år.

Neonrör var en av de första urladdningslamporna som blev kommersiellt tillgängliga och vissa försök gjordes med att odla med neonlampor, men någon större utbredning blev det inte. Även Xenonlampor, som vi idag känner igen från många bilars strålkastare, har använts till växtbelysning. Den s.k. blandljuslampan, en hybrid mellan en glödlampa och en kvicksilverlampa, fick däremot större spridning. Till blandljuslampans fördelar hör billig installation, därför att den inte behöver något förkopplingsdon utan kan anslutas direkt till vanlig nätspänning. Dessutom fanns det varianter med reflektor integrerad i glaskolven vilket ytterligare förenklade installationen. Däremot är ljusutbytet lågt och idag används inte blandljuslampor längre i växthus.

Kvicksilverlampan fick utbredning tack varit sin långa livslängd och, jämfört med ovan nämnda lamptyper, höga ljusutbyte. Senare typer av urladdningslampor har dock betydligt högre ljusutbyte och idag är kvicksilverlampan utfasad både på grund av lågt ljusutbyte och det höga innehållet av kvicksilver.

4.2 Lysrör och kompaktlysror

Lysröret är en av historiens mest framgångsrika ljuskällor på grund av sitt höga ljusutbyte och långa livslängd. Principen bygger på att en blandning av argon och kvicksilverånga i röret joniseras och därvid börjar avge UV-ljus. I det speciella ”ljuspulvret” som finns på insidan av röret omvandlas UV-ljuset till synliga våglängder i en process som kallas fluorescens (fluorescens innebär att en yta som belyses med en våglängd reflekterar ut ljus av en annan våglängd). Lysröret kräver förkopplingsdon i form av en strömbegränsare (”reaktor” eller ”drossel”) samt en glimtändare som har till uppgift att i tändögonblicket sända ström igenom elektroderna i lysröret för att värma upp dessa så att kvicksilvret förångas. Modernare varianter av lysrör har elektroniska förkopplingsdon och saknar reaktor och glimtändare. Dessa varianter är också dimbara, och flimrar inte på samma sätt som äldre typer av lysrör. Lysrör avger ett ljus relativt rikt på blått ljus och alltså ett ganska kallvitt ljus (figur 3). Nyare typer av ljuspulver har dock medfört att man i viss mån kan få olika ljuskvalitéer, även varmvitt ljus.



Figur 3: Spektralfördelningen hos lysrör, Sylvania luxline plus cool white, 58W. Mätmetod: JAZ, Ocean Optics

4.3 Urladdningslampor

Idag används huvudsakligen två typer av urladdningslampor, metallhalogen (MH eller HPI-lampor) samt högtrycksnatrium (HPS). Den förstnämnda avger ett spektrum med ganska mycket blått ljus varför våra ögon uppfattar ljuset som kallvitt. Den senare avger det karakteristiska gula ljuset med högt innehåll av gult och rött ljus men väldigt lite blått. I en högtrycksnatriumlampa finns xenongas samt natrium och kvicksilver i ett rör. Under upptändningsfasen leds ström igenom xenongasen, som då joniseras och avger ett vitt ljus. Efter en knapp minut har natriumet och kvicksilvret börjat förgasas och ljusets sken ändrar då färg till gul-orange.

Det tar normalt c:a 4 minuter efter tändning innan en HPS-lampa uppnår full ljusstyrka. Om lampan släcks måste den svalna några minuter innan den kan tända om. HPS-lampan kräver förkopplingsdon i form av ballast (drossel), tändapparat och kondensator. Numera finns även HPS-lampor med elektroniska drivdon, som ersätter de tre komponenterna i en lampa med elektromagnetiska drivdon. Elektroniska drivdon har lägre förluster än elektromagnetiska, väger mindre och ger armaturen en något mindre volym. Dessutom innebär elektroniska drivdon ibland viss möjlighet till dimning av effekten.

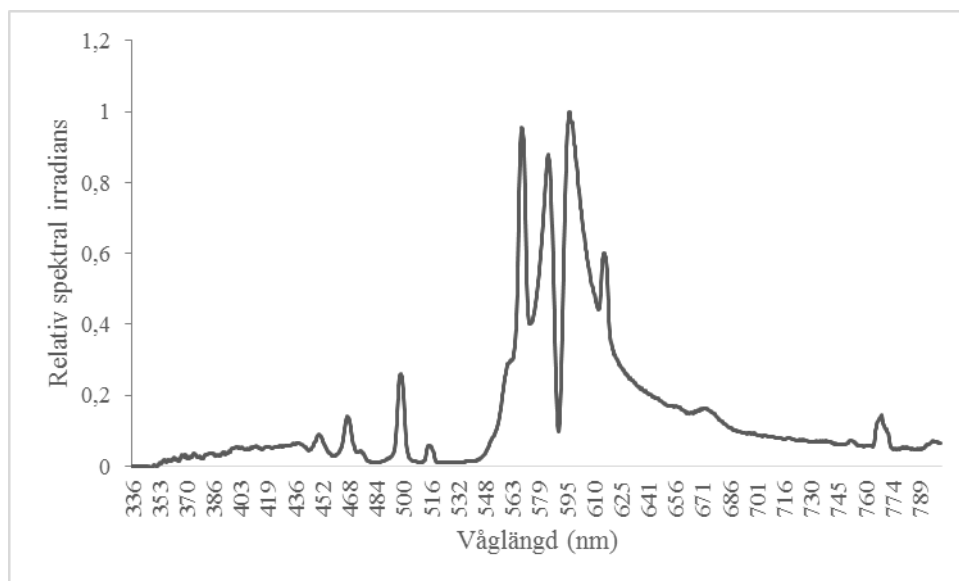
HPS-lampor avsedda för hortikulturell användning förekommer i effekterna 250, 400, 600, 750 och 1000 W. Det vanligaste hittills har varit 400 W men i nyinstallationer idag är 600 W vanligast. 1000 W armaturer har en dubbelsocklad armatur och har alltid elektroniskt drivdon, medan övriga effekter har traditionell skruvsockel och förekommer både med elektronisk och elektromagnetiska drivdon. Det förekommer både typer avsedda för fas-0 installation (230 V, kan kopplas med gummikabel och stickpropp) och fas-fas installation (400 V, alltid fast installation). Cirka 30% av insatt elenergi blir till synligt ljus i en HPS-lampa. 600 och 1000 W lampor har högre effektivitet än 400 W (tabell 2). Den energi som inte blir till ljus blir till värme, som huvudsakligen avges som strålningsvärme (IR), vilken strålar från lampan i samma riktning som det synliga ljuset.

HPS-lampan avger som sagt ett gulaktigt ljus, med lite innehåll av blått ljus (figur 4). Däremot har den hög avgivning av orange-rött ljus i området runt 600 nm, vilket absorberas väl av plantorna enligt McCree-spektret (figur 2). Att ljus från HPS-lampor skulle vara olämpligt för växter, vilket ibland hävdas, är alltså felaktigt. Dessutom har HPS-lampan ett fördelaktigt rött:långroöttförhållande på c:a 5:1, vilket innebär begränsad sträckningstillväxt hos plantor som odlas med HPS-ljus.

HPS-lampan har i praktiken en livslängd på c:a 12000-14000 timmar (Baevre & Gislerød 1999). Därefter behöver själva ljuskällan bytas ut. Armaturen har ofta betydligt längre livslängd, c:a 20-25 år. Däremot blir reflektorn ofta nersmutsad av inbränt damm vilket innebär att den kan behöva rengöras då och då. Eftersom en HPS-ljuskälla är rundstrålande är reflektorn en vital del i systemet.



Bild 3: Installation med 600 W HPS-lampor i året-runtodling av tomater hos Orre gartneri, Jæren, Norge. Foto: K-J Bergstrand



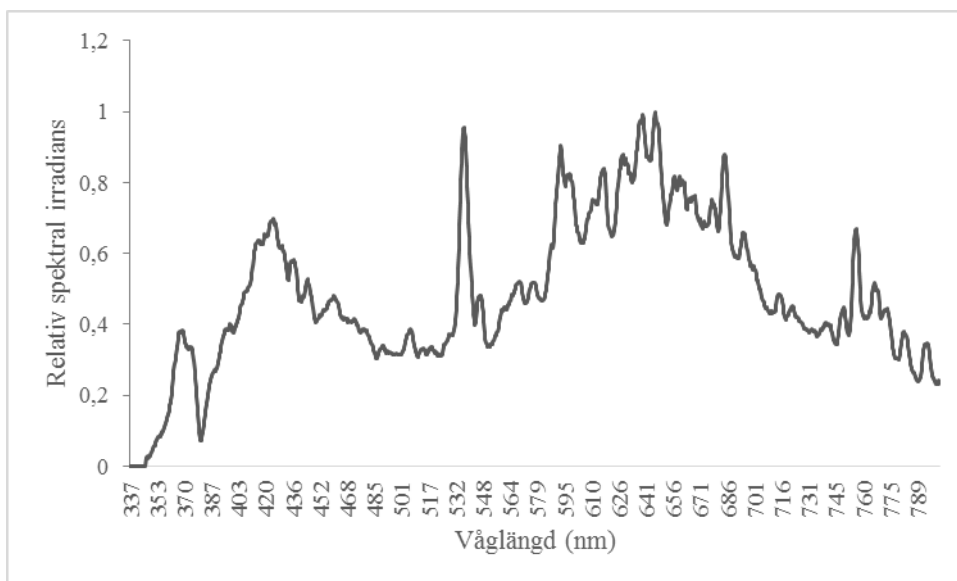
Figur 4: Spektralfördelningen hos HPS-lampa (Philips Master GreenPower 400 W). Mätmetod: JAZ, Ocean Optics

Metallhalogen- eller HPI-lampor finns i olika modeller liknar till funktionssättet HPS-lampor. Den huvudsakliga skillnaden ligger i spektret, där metallhalogenlampor avger ett mer komplett spektrum även innehållande blått och grönt ljus (figur 5), vilket gör att vi uppfattar ljuset som vitt. Det finns HPI-lampor som passar i

samma armaturer som HPS-lampor. HPI-lampor används på grund av sitt vita ljus i arbets- och försäljningslokaler, samt i odlingskammare. Användningen i kommersiella växthus är numera begränsad, på grund av att lampornas effektivitet är lägre än hos HPS-lampor. En förbättrad variant är så kallade keramiska metallhalogenlampor. Dessa har lång livslängd, upp till 15.000 h. En modell på 315 W med elektroniskt drivdon marknadsförs av Solljus AB. Denna modell har en sluten reflektor som förhindrar nedsmutsning av reflektorn, samt en utbytbar lins som gör det möjligt att få en god ljusfördelning även då lampan monteras relativt nära kulturen.



Bild 4: Keramisk metallhalogenlampa med sluten reflektor (Solljus AB). Foto: K-J Bergstrand



*Figur 5: Spektralfördelning hos keramisk metallhalogenlampa (Solljus 150 W).
Mätmetod: JAZ, Ocean Optics*

4.4 LED-lampor

LED-tekniken (Light Emitting Diode, lysdiod) kom på marknaden under 1960-talet, men först in på 2000-talet hade man fått fram så ljusstarka dioder att tekniken kunde komma ifråga för användning till växtbelysning. LED-tekniken har flera fördelar som gör den attraktiv för växtbelysning; lång livslängd, robusthet, möjlighet att designa/förändra ljusspektret (använda smalspektrumljus), hög verkningsgrad samt ett modulärt uppbyggnadssätt vilket ger stora möjligheter att konstruera armaturer i olika effekter och utföranden. Själva dioden består av olika sammansatta halvledarelement med olika energinivå. Då ström flyter igenom dioden från den högre till den lägre energinivån avges skillnaden i energinivå i form av fotoner (ljus). "Energigapet" mellan de olika halvledarelementen bestämmer våglängden hos det emitterade ljuset (Stutte 2009). En lysdiod kan sägas vara en omvänd solcell. En lysdiod drivs med låg spänning och likström vilket innebär att förkopplingsdon (drivarelektronik) krävs.

En viktig skillnad mellan LED-baserade ljuskällor och andra ljuskällor är värmehanteringen. Alla lamptyper avger värme; även hos de mest effektiva LED-lamporna är det mindre än 50% av den inmatade energin som blir till ljus, resten blir värme. Urladdningslampor avger det mesta av sin värme som värmestrålning (Infraröd strålning), riktat åt samma håll som det synliga ljuset. LED-lampor däremot avger väldigt lite IR-strålning. Värmen uppkommer istället som sensibel (kännbar) värme i själva dioden. Eftersom både effektiviteten och livslängden hos dioden sjunker kraftigt med ökande temperatur är god kylning ett måste. Normalt sett är dioderna monterade på någon form av lättmetallplatta som leder bort värmen från diodens baksida. Från metallplattan kan värmen föras vidare bort från armaturen på tre olika sätt; passiv luftkylning (konvektion), aktiv luftkylning (fläktar) eller via vatten. De två sistnämnda lämpar sig bäst för kompakta armaturer med hög ljusavgivning.

Passiv luftkylning används oftast för långsmala armaturtyper avsedda t.ex. för interlighting. Ibland är dessa försedda med kylflänsar för att öka den värmeavgivande ytan. Fördelarna med passiv kylning är driftsäkert, okänsligt och tyst. Nackdelen är att sådana system ibland inte klarar av att hålla armaturens temperatur nere, speciellt om armaturerna är placerade så att de utsätts för solljus.

Fläktkylning innebär bättre möjligheter att hålla temperaturen nere. Nackdelarna är att fläktarna avger ljud, att de ökar armaturens strömförbrukning, att de med tiden kan gå sönder samt att fläktkylning i dammiga miljöer riskerar att innebära dammavlagringar i armaturen som med tiden försämrar kylningen.

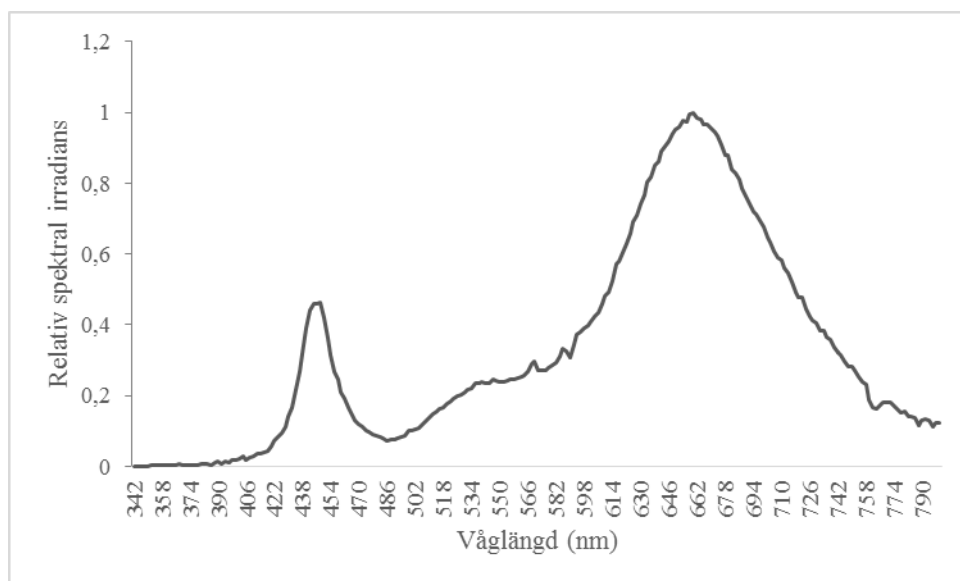
Vattenkylning har hittills inte varit vanligt men har några tilltalande fördelar; god kylning, tyst drift samt möjligheten att föra ut värmen ur växthuset och lagra den i

en bufferttank, för det tillfälle att det finns ljusbehov men inget värmebehov. Dessutom kan armaturen göras mer kompakt när inga kylflänsar behövs. Nackdelarna är främst högre installationskostnad samt potentiella problem med läckage i systemet.

Genom att kombinera olika typer av dioder som avger olika våglängd kan man alltså få fram i stort sett vilket spektrum som helst. I vissa armaturtyper kan man dessutom variera spektret, antingen med reglage direkt på armaturen eller genom ett datorprogram. Förändringen uppnås genom att de olika våglängderna regleras upp eller ner i förhållande till varandra, vilket förutsätter att armaturen är uppbyggd av flera olika typer av dioder. Varje typ av diod har ett fast spektrum som inte kan ändras och som beror på vilken kombination av olika metaller dioden är uppbyggd av. Det finns även lysdioder som avger vitt ljus. Detta är då i grunden en blå lysdiod som försetts med ett fluorescerande fosforskikt, likande det som finns i lysrör. Fosfor tar upp det blåa ljuset och omvandlar det till många olika våglängder så att ljuset uppfattas som vitt.

Det går inte som hos en glödlampa att variera effekten hos en lysdiod genom att ändra spänningen. Ändring i effekten uppnås istället genom pulsbreddsmodulering av strömmen.

Många system på marknaden är huvudsakligen komponerade av röda och blå dioder, dels för att fotosyntesens absorptionsspektrum har sina toppar där (figur 2), men även därför att röda och blå dioder är mest effektiva (Nelson & Bugbee 2014). Det kan dock vara en fördel att ha ett visst inslag av andra våglängder, t.ex. grönt ljus, inte minst för att det mänskliga ögat då uppfattar ljuset som vitaktigt istället för den otrevliga rosa/lila tonen som blir resultatet av en blandning av rött och blått. Man kan även använda vita dioder, även om dessa har något lägre ljusutbyte än röda eller blå. Det finns även dioder för mörkrött ljus och UV-ljus. Det förstnämnda är användbart t.ex. för blomningsreglering medan det sistnämnda kan ha positiv effekt på bildning av anthocyaniner i bladet (t.ex. färgningen av rödbladiga sallatssorter).



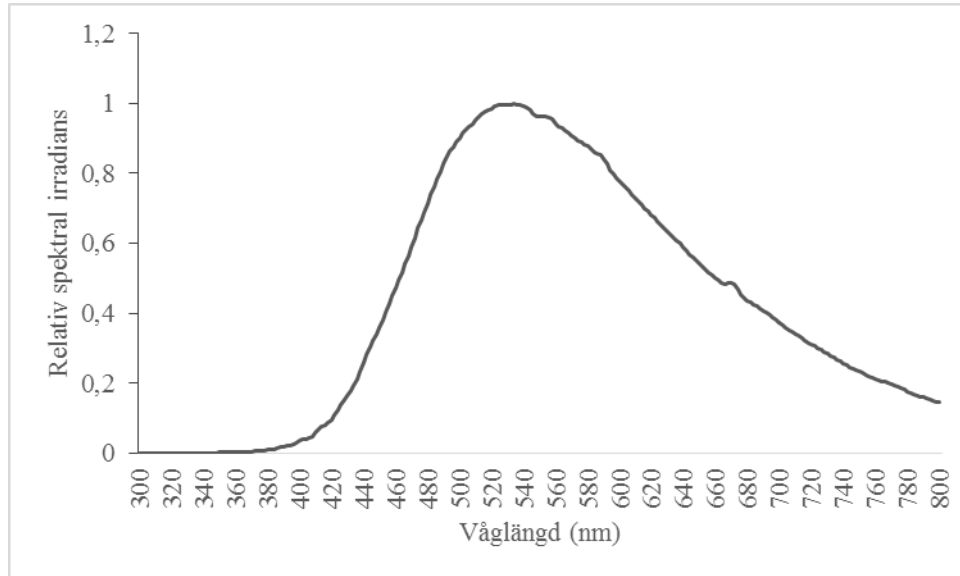
Figur 6: Den spektrala sammansättningen av ljuset från en LED-armatur anpassad för odling. Andelen blått ljus är c:a 14% och andelen rött ljus ungefär 53%.



Bild 5: 330 W LED-lampor (Venso Ecosolutions) i krukväxtproduktion hos Gluggstorps handelsträdgård, Tågarp. Foto: K-J Bergstrand

4.5 Andra lamptyper

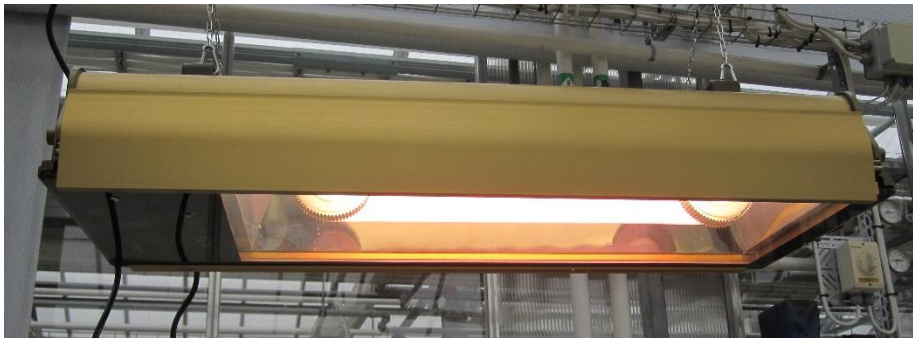
Utöver LED-lampor finns det ytterligare några lamptyper som nyligen introducerats eller är på väg att introduceras på marknaden. En hel del intresse har riktats mot s.k. *plasmalampor* (tidigare även kallade mikrovågslampor). Principen bygger på att en bulb innehållande svavel eller metallhalid utsätts för kraftig mikrovågsstrålning, så att ämnet upphetas tills det uppnår plasmatillstånd och då börjar utsöndra ljus. Beroende på ljusämnets sammansättning kan man få lite olika spektra, men generellt är ljusets spektrala sammansättning är snarlikt solljus (figur 7), och uppfattas av det mänskliga ögat som kallvitt. Ljuset innehåller alltså mycket blått ljus och grönt ljus men lite mindre rött ljus. Därför kan sådana lampor lämpligen kompletteras med en ljuskälla som avger rött ljus, t.ex. en LED-lampa. Livslängden för en plasmalampa ligger på 30 000-50 000 h. Värmen avges huvudsakligen via konvektion så kylflänsar eller kylfläktar är nödvändiga. Lamptypen avger inte så mycket värme (IR-) strålning. Några uppgifter om effektiviteten hos plasmalampor finns inte tillgänglig i skrivande stund och de praktiska erfarenheterna av tekniken är begränsade.



Figur 7: Spektralfördelningen hos en lampa av typen svavel-plasma.



Bild 5: (överst), plasmalampa, bild 6: (nederst), induktionslampa. Foto: K-J Bergstrand



Induktionslampor har ett funktionssätt liknande lysrör, men med skillnaden att inga elektroder finns inne i själva röret (som oftast är ringformigt), utan energin överförs genom induktion via en elektromagnet placerad utanför röret. Den främsta fördelen med tekniken är den långa livslängden, som ska kunna vara upp till 100 000 h. Viss valfrihet finns vad gäller ljusets spektrala sammansättning. Uppgifter om effektiviteten i $\mu\text{mol/W}$ finns ej tillgängliga. I odlingsförsök på Alnarp blev resultaten ganska svaga (Bergstrand & Schüssler 2012).

Fältemissionslampan är en teknik som utvecklats av det svenska företaget LightLab AB. Tekniken kan tänkas vara intressant för odlingssammanhang men har ännu inte introducerats kommersiellt.

4.6 Effektiviteten hos olika lamptyper

Effektiviteten hos en ljuskälla mäts bäst i $\mu\text{mol/W}$, men kan även uttryckas i procent. Typiska värden ligger på 25-35% verkningsgrad, d.v.s. den andelen av den inmatade strömmen som blir till ljus. Resten blir värme. Tabell 2 visar effektiviteten hos olika typer av ljuskällor på marknaden (Obs, tillverkarnas uppgifter). Ju högre tal, desto bättre. Detta mått tar dock ingen hänsyn till ljusets spektrala kvalitet, d.v.s. ett ljus som är bättre anpassat till växtens absorptionspektrum får en ”fördel” jämfört med ett ”sämre” ljus. Att mäta effektiviteten hos en ljuskälla är en grannliga uppgift som endast utförs av certifierade laboratorier.

Typ av ljuskälla	Modell	Effektivitet $\mu\text{mol/W}$
HPS	Philips 400 W	1,5
HPS	Philips 600 W	1,8
HPS	Gavita 1000 W	2,0
LED	Philips toplight	2,3
LED	Valoya B100	1,65
LED	Heliospectra LX60	1,6
LED	Fionia FL300	2,4

Tabell 2: Effektiviteten hos olika ljuskällor, uttrycks som $\mu\text{mol/W}$. Tillverkarnas uppgifter (Bergstrand m.fl. 2015b).

5 Kulturerna

Gurka: Vid plantuppdagning, ljusintensitet $250 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$, ljusintegral 20 mol/dag, ljus 20 h/dygn. Vid vinterproduktion: Intensitet upp till $300 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$, 20-22 h fotoperiod, ljusintegral upp till 25 mol/dag. Kontinuerligt ljus skadligt. (Moe m.fl. 2006).

Tomat: Vid plantuppdagning intensitet c:a $200 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ under 18-20 h/dygn (daglig ljusintegral 16 mol/dag). Vid vinterproduktion: Ljusintensitet 250-300

$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, ljus under 18 h/dygn, ljusintegral 22-25 mol/dygn. Kontinuerligt ljus skadligt. (Moe m.fl. 2006).

Kryddor & sallat: Odlas vanligtvis intensivt med c:a $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Julstjärna: Intensitet $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 10 h/dygn efter start av kortdagsbehandling. Ljusintegral 15 mol/dag. (Moe m.fl. 2006).

Krukkrysanthemum: Intensitet upp till $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 10-11 h/dygn efter start av kortdagsbehandling. Ljusintegral 15 mol/dag. (Moe m.fl. 2006).

Krukrosor: $100\text{-}150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 20 h/dygn (Mortensen 2014).

Gerbera: Intensitet $<200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Tillskottsljus 10 h/dygn. DLI 10-12 mol. (Moe m.fl. 2006).

Kalanchoë: $100\text{-}150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ i 10 h/dygn efter start av kortdagsbehandling, 16 h/dygn före start av kortdagsbehandling.

6 System på marknaden

6.1 Urladdningslampor

Högtrycksnatriumlampor förekommer i effekterna 250, 400, 600, 750 och 1000 W. 250 W armaturerna är avsedda för interlighting. 400 och 600 W armaturer förekommer både för fas-till-fas och fas-0 koppling. 750 och 1000 W har alltid elektroniska drivdon och är avsedda för fas-fas koppling. 600 W armaturer finns både med elektroniska och elektromagnetiska drivdon. Upp till 600 W har ljuskällan E40 skruvsockel medan 750 och 1000 W har anslutning i båda ändarna av röret. Det finns ett flertal leverantörer av armaturer för urladdningslampor. Under skalet används oftast samma eller snarlika komponenter; däremot finns vissa yttre skillnader vad gäller utformning av kapsling och reflektor. Det finns tre dominerande leverantörer av ljuskällor; Philips, Osram och General Electric. Produkterna är snarlika, vissa mindre skillnader i spektralfördelningen förekommer. Det finns även metallhalogenlampor (HPI-T, Philips) som passar i en högtrycksnatriumarmatur. Vidare finns det keramiska metallhalogenlampor (Solljus AB) som kräver särskild armatur.

Kompaktlysrör ("lågenergilampor") i högre effekter (85 W) marknadsförs t.ex. av Trädgårdsteknik. Tillsammans med en enkel reflektor kan sådana lampor utgöra en lösning med väldigt låg installationskostnad.

6.2 LED-lampor

Heliospectra har tre olika modeller på sitt program; L4A, RX och LX. De båda förstnämnda är huvudsakligen avsedda för försöksverksamhet m.m. medan den sistnämnda är avsedda för kommersiella växthus. LX-serien har en maximal effekt på 630 W, och kyls med varvtalsstyrda fläktar. Lamporna kan även anslutas till kanalsystem om man vill föra värmen ut ur växthuset. Belysningen styrs med Heliospectras egen programvara, via dator, telefon eller surfplatta. LX-serien har tre kanaler (tre olika ljuskvalitéer, blått, rött och vitt), som kan styras individuellt 0-100% via programvaran. Andra ljuskvalitéer kan fås mot förfrågan. RX och L4A-serierna har fler kanaler.



Bild 7: Heliospectra LX60. Foto: © Heliospectra

Valoya har valt att jobba med fasta spektra. De erbjuder 5 olika spektra, se tabell 3. AP67 och AP673 är avsedda för vegetativ tillväxt. G2 innehåller mycket rött och mörkrött ljus och är avsedd för fotoperiodiskt ljus (blomningsreglering). NS1 innehåller mycket blått ljus och ger upphov till väldigt kompakta plantor. Architectural är inte i första hand avsedd för odlingsändamål.

Vidare har Valoya fem olika typer av armaturer. C-serien är avlånga armaturer på 65 eller 95 W, avsedda för odlingskammare. De finns att få med spektra AP67, AP673, G2 och Architectural. B-serien är även de avlånga armaturer, avsedda för växthus. De finns i effekter från 55 till 192W. R-serien har ett kompakt format som påminner om en traditionell växthusarmatur. Den finns i effekter på 138 eller 276 W och kan fås med samtliga spektra. L-serien har formen av ett vanligt T8-lysrör

och kan användas i armaturer avsedda för sådana. Den finns i olika längder med effekter på 10, 14, 18 eller 30 W. Alla spektra utom NS1 finns tillgängliga.

Slutligen finns en 7 W ljuskälla med vanlig E27-fattning, avsett i första hand för fotoperiodiskt ljus. Den kan fås med G2, AP67, AP673 eller specialanpassat spektrum. Samtliga Valoyas modeller är passivt luftkylda med kylflänsar.

Spektral-fördelning	AP67	AP673	G2	NS1	Architectural
blått	14 %	12 %	8 %	20 %	14 %
grönt	16 %	19 %	2 %	39 %	31 %
rött	53 %	61 %	65 %	35 %	43 %
mörkrött	17 %	8 %	25 %	5 %	12 %

Tabell 3: Spektralfördelningen hos Valoyas olika spektra.



Bild 8: Valoya B-serien. Foto: © Valoya

Fionia erbjuder 600 W armaturer med ungefär samma ytermått som en vanlig växthusarmatur. Armaturerna är fläktkylda och kan fås med olika spektra, ett "grow" spektrum med huvudsakligen rött och blått ljus, ett "sunlight" spektrum med mycket blått ljus, ett "grow white" spektrum som utöver rött och blått ljus även innehåller vitt ljus, samt ett spektrum avsett för algodling. Armaturernas effekt och spektralfördelning kan styras, antingen via Senmatic LCC4 klimator om sådan finns installerad, i annat fall via separat programvara.



Bild 9: 600 W LED-armatur från Fionia lighting. Foto: ©Fionia lighting

Philips har satsat på passivt kylda avlånga armaturer med kapsling i aluminium. De finns både avsedda för flerlagerodling, för montering inne mellan plantrader och för belysning ovanifrån ("toplight"). Dessutom finns det lampor med E27-fattning och spektrum med mycket mörkrött ljus för fotoperiodisk belysning. Det erbjuds olika spektra baserade på rött, blått och mörkrött ljus. Det går inte att reglera effekt eller spektrum i efterhand.

Venso Eco-solutions levererar 330 W armaturer avsedda att ersätta HPS-armaturer. De är fläktkylda och har ett fast spektrum med rött och blått ljus.

Trädgårdsteknik säljer fläktkylda armaturer på 90 eller 120 W med spektrum baserat på rött, blått och vitt ljus. Man har även LED-lampor med E40-sockel avsedda för montering inne mellan plantrader (54 W, rött, blått och vitt ljus).

BML Custom saknar representant på den svenska marknaden men erbjuder kunden att själv komponera sitt eget spektrum utifrån 11 olika våglängder (www.bmlcustom.com).

Lemnis Inte heller det nederländska företaget Lemnis har någon svensk representant, men erbjuder en intressant lösning med vattenkylning.

6.3 Andra lamptyper

Gavita marknadsför plasmalampor på 300 W. Även det amerikanska företaget **Chameleon grow systems** säljer plasmalampor avsedda för odlingsändamål.

7 Leverantörerna

Cronholm & Magnusson teknik AB

Segergatan 52
261 47 Landskrona
0418-213 00
www.cmteknik.se
LED, återförsäljare Fionia

Gavita AS

Moreneveien 1
N-3158 Andebu, Norge
+47 33 43 80 80
www.gavita.no
HPS 400, 600, 750, 1000 W. Plasma.

Heliospectra AB

Frans Perssons väg 6, Delsjömotet
412 76 Göteborg
031-40 67 10
www.heliospectra.com
LED

ProGro AB

Björksgatan 6B, 632 21 Eskilstuna.
016-35 70 60
www.progro.se
HPS/HPI 400, 600 W. LED, Återförsäljare för Valoya.

Solljus AB

Odenskogsvägen 36, 831 48 Östersund
063-181158
www.solljus.se
Keramisk metallhalogen

Trädgårdsteknik AB

Helsingborgsvägen 578
262 96 Ängelholm
0431-222 90
www.tradgardsteknik.se
HPS/HPI 400, 600 W. LED. Kompaktlysrör.

Toragon AB

Umestan företagspark hus 3
903 47 Umeå

090-100 260

www.toragon.se

Mätutrustning

UBA växtteknik

Industrigatan 12

212 14 Malmö

040-18 76 83

www.uba.se

HPS 400, 600, 1000 W, HPI 400 W.

Venso EcoSolutions AB

Ögärdesvägen 21

433 30 Partille

031-340 002 50

venso-ecosolutions.se

LED

Tack till:

Stiftelsen lantbruksforskning som finansierat projektet inom vilket kompendiet utarbetats. Tack också till Heliospectra AB, Fionia lighting samt Valoya som ställt bildmaterial till förfogande.

8 Referenser

- Bergstrand, K.-J., Asp, H., Larsson-Jönsson, E.H. and Schüssler, H.K. (2015a) Plant developmental consequences of lighting from above or below in the production of Poinsettia. *European Journal of Horticultural Sciences* 80(2), 51-55.
- Bergstrand, K.-J., Asp, H., Schüssler, H.K. (2015b) Utnyttja belysningen effektivt. LTV-fakultetens faktablad 2015:3.
- Bergstrand, K.-J., Asp, H. and Schüssler, H.K. (2014) Nya möjligheter att kontrollera tillväxten hos utplanteringsväxter med hjälp av ljuset, LTV-fakultetens faktablad 2014:20, Alnarp.
- Bergstrand, K.-J. and Schüssler, H. K. (2012) Nya tekniker inom växthusbelysning, LTJ-fakultetens faktablad 2012:26, Alnarp.
- Bævre, O.A. and Gislerød, H.R. (1999) *Plantedyrking i regulert klima*, Landbruksforlaget.
- Canham, A.E. (1966) *Artificial light in horticulture*, Centrex Publishing Company, Eindhoven.
- Dueck, T., Janse, J., Eveleens, B., Kempkes, F. and Marcelis, L. (2011) Growth of tomatoes under hybrid LED and HPS lighting. *Acta Horticulturae* 952, 335-342.
- Hovi-Pekkanen, T. and Tahvonen, R. (2008) Effects of interlighting on yield and external fruit quality in year-round cultivated cucumber. *Scientia Horticulturae* 116(2), 152-161.
- Lind, E. and Thulin, J.A. (1939) *Svenska trädgårdar*, Svenska Yrkesförlaget AB, Stockholm.
- Jennerich, L. and Hendriks, L. (1993) *Assimilationslicht*, Bernhard Thalacker Verlag GmbH & Co, Braunschweig.
- McCree, K.J. (1972) Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology* 10, 443-453.
- Moe, R., Grimstad, S.O. and Gislerød, H.R. (2006) The Use of Artificial Light in Year Round Production of Greenhouse Crops in Norway. *Acta Horticulturae* 711, 35-42.
- Mortensen, L.M. (2014) The Effect of Photon Flux Density and Lighting Period on Growth, Flowering, Powdery Mildew and Water Relations of Miniature Roses. *American Journal of Plant Sciences* 5(13), 1813.
- Mortensen, L.M. (2000) Advances in floriculture research. Strømme, E. (ed), pp. 94-102, Agricultural University of Norway, Ås.

- Nelson, J.A. and Bugbee, B. (2014) Economic analysis of greenhouse lighting: Light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. *PloS one* 9(6).
- Ransmark, S.-E. (2002) Analys av ljus och introducerandet av en kvalitetsfaktor för hortikulturella ändamål, JBT, Alnarp.
- Rünger, W. (1964) Licht und Temperatur im Zierpflanzenbau. Verlag Paul Parey, Berlin.
- Schüssler, H.K. and Bergstrand, K.-J. (2012) Control of the Shoot Elongation in Bedding Plants Using Extreme Short Day Treatments. *Acta Horticulturae* 956, 409-415.
- Stutte, G.W. (2009) Light-emitting diodes for manipulating the phytochrome apparatus. *HortScience* 44(2), 231-234.
- Taiz, L. and Zeiger, E. (2002) *Plant Physiology*, Sinauer Associates, Inc., Sunderland.
- Terfa, M.T., Solhaug, K.A., Gislerød, H.R., Olsen, J.E. and Torre, S. (2013) A high proportion of blue light increases the photosynthesis capacity and leaf formation rate of *Rosa*× *hybrida* but does not affect time to flower opening. *Physiologia plantarum* 148(1), 146-159.
- Trouwborst, G., Oosterkamp, J., Hogewoning, S.W., Harbinson, J. and Van Ieperen, W. (2010) The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. *Physiologia Plantarum* 138(3), 289-300.